

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh přehřívání páry pro turbínu tlakovodní jaderné elektrárny

Design of Steam Reheating for the Turbine of the Pressurized Nuclear Power Plant

Študent:

Bc. Juraj Trgiňa

Vedúci diplomovej práce:

Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2018

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb.- autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst.3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce.
- souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřou licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla naloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

Juraj Trgiňa

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

ANOTÁCIA DIPLOMOVEJ PRÁCE

TRGIŇA, J. *Návrh přehřívání páry pro turbínu tlakovodní jaderné elektrárny: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2018, 55s . Vedúci práce: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Táto diplomová práca sa zaoberá projekčným návrhom separátora – prehrievača pary, pre jadrovú elektrárňu za účelom odstránenia vlhkosti z pracovnej pary a zvýšenia účinnosti celého obehu jadrovej elektrárne. V prvej časti práce je popísaný účel systému so základným rozdelením zariadení na odstraňovanie vlhkosti z pracovnej pary a s podrobnejším popisom vybraného typu separátora – prehrievača pary. V ďalšej časti je prevedený výpočet základných rozmerov separačnej časti, tepelný, hydraulický a pevnostný výpočet zariadenia, s návrhom jeho základných rozmerov. V závere práce sú tieto výpočty zhodnotené. Diplomová práca obsahuje 3D model separátora – prehrievača pary v programe Inventor, výkresovú dokumentáciu a schému zapojenia zariadenia do parného obehu.

Kľúčové slová: Separátor – prehrievač, jadrová elektrárňu, vlhkosť

ANOTATION OF MASTER'S THESIS

TRGINA, J. *Design of Steam Reheating for the Turbine of the Pressurized Nuclear Power Plant: Master's thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, 2018, 55p. Thesis, head: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

The main focus of this master's thesis is a project design of the separator, a steam preheater, for the nuclear power plant in order to remove the moisture from the working steam and to increase overall efficiency of the circulation of the nuclear power plant. In the first part of the thesis, the purpose of the system, basic distribution of the equipment for the moisture removal from the working steam, as well as a more detailed description of the type of the separator selected is described. In the following part, there are calculated basic dimensions of the separation part and thermal, hydraulic and strength device calculations with a draft of its basic dimensions. At the end of the work, these calculations are evaluated. The thesis contains a 3D model of the separator, the steam preheater, created in, the drawing documentation and a scheme of the connection of the device with the steam circuit.

Keywords: separator, a steam preheater, nuclear power plant, moisture

Obsah

Zoznam značiek a jednotiek	7
Zoznam skratiek	9
1 ÚVOD	9
2 SEPARÁCIA VHLKOSTI Z PRACOVNEJ PARY	10
2.1 Separácia vlhkosti v prietochnej časti turbín	10
2.2 Vonkajšia separácia vlhkosti	10
2.2.1 Cyklónové separátory	11
2.2.2 Sitové separátory	11
2.2.3 Žalúziové separátory	12
3 PREHRIEVANIE PARY.....	13
4 NÁVRH SEPARÁTORA – PREHRIEVAČA	13
4.1 Kondenzačná parná turbína Škoda, typ K 220 – 44	13
4.2 Separátor – prehrievač pary, typ 220 M	15
4.2.1 Zloženie systému SPP	16
5 POPIS SYSTÉMU SPP	17
6 VÝPOČET ŽALÚZIOVÉHO SEPARÁTORA	18
7 TEPELNÝ VÝPOČET.....	21
7.2 Hodnoty potrebné pre výpočet	21
7.1 Tepelný výpočet I. stupňa prehrievača	22
7.3 Hodnoty potrebné pre výpočet II. stupňa	29
7.4 Tepelný výpočet II. stupňa prehrievača	30
8 HYDRAULICKÝ VÝPOČET	35
8.1 PRIEREZY PRE PRIECHOD PREHRIEVANEJ PARY	36
8.2 Koeficienty tlakových strát	37
8.3 Výpočet rýchlosti pracovnej pary pri prechode jednotlivými časťami SPP	37
8.4 Výpočet tlakových strát pracovnej pary	40
9 PEVNOSTNÝ VÝPOČET	45
9.1 Pevnostná kontrola valcového plášťa separátora – prehrievača	45
9.2 Pevnostná kontrola eliptického dna nádoby	47
9.3 Pevnostná kontrola kuželového veka	49
9.4 Pevnostná kontrola orebrovanej rúrky	50
9.5 Pevnostná kontrola rozvádzačej rúrky	51
10 MODEL SEPARÁTORA – PREHRIEVAČA PARY	52
11 ZÁVER.....	53

Zoznam značiek a jednotiek

E	[1]	koeficient efektívnosti rebra
H _v	[m ²]	výpočtová plocha
H _s	[m ²]	skutočná plocha
L _r	[m]	dĺžka orebrovanej časti rúrky
L _s	[m]	skutočná dĺžka rúrky
L _v	[m]	výpočtová dĺžka rúrky
Nu	[1]	Nusseltovo kritérium
Pr	[1]	Prandtlovo kritérium
Q	[W]	tepelný výkon
Re	[1]	Reynoldsovo kritérium
Re	[MPa]	medza klzu
R _m	[MPa]	medza pevnosti
S _h	[m ²]	plocha hladkej časti rúrok
S _{kt}	[m ²]	teoretický prierez kazety
S _{ks}	[m ²]	skutočný prierez kazety
S _r	[m ²]	plocha rebier
c	[MPa]	prídavok na koróziu
D	[m]	priemer
d	[m]	priemer rúrky
d _e	[m]	ekvivalentný priemer
f _c	[m ²]	prierez krycích plechov
h	[m]	výška rebra
i	[kJ·kg ⁻¹]	entalpia pary
k	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	prestup tepla
k _r	[%]	koeficient rezervnej plochy
l	[m]	rozvin dĺžky koryta vytvoreného rebrami
lv	[kJ·kg ⁻¹]	výparné teplo
lk	[m]	teoretická strana kazety
m	[kg·s ⁻¹]	hmotnostný prietok
nr	[1]	počet rúrok
o ₁	[1]	počet hlavíc jednej kazety

o_2	[1]	počet distančných mriežok jednej kazety
p	[Pa]	tlak pary
p_s	[MPa]	skúšobný tlak pre tlakovú skúšku
Δp	[Pa]	tlaková strata
q	[W·m ⁻²]	merný tepelný tok
s	[m]	hrúbka steny
t	[°C]	teplota
Δt	[°C]	stredný logaritmický tepelný spád
u	[m]	obmývaný obvod stupňa prehrievača
u_p	[m]	obmývaný obvod prepážiek
u_d	[m]	obmývaný obvod dosiek
w	[m·s ⁻¹]	rýchlosť pary
x	[1]	suchosť pary
x_e	[1]	koeficient bezpečnosti k medzi klzu
x_m	[1]	koeficient bezpečnosti k medzi pevnosti
x_s	[1]	koeficient bezpečnosti pre tlakovú skúšku
z	[1]	počet
α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	súčiniteľ prestupu tepla
β	[1]	trecí súčiniteľ
δ	[m]	hrúbka rebra
ε	[1]	koeficient znečistenia
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	súčiniteľ tepelnej vodivosti
η	[Pa·s]	dynamická viskozita
ν	[m ² ·s ⁻¹]	kinematická viskozita
ξ	[1]	koeficient tlakových strát
π	[1]	Ludolfovo číslo
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota
σ	[MPa]	napätie od vnútorného pretlaku
σ_D	[MPa]	dovolené namáhanie pre prevádzkový stav
σ_S	[MPa]	dovolené namáhanie pre tlakovú skúšku
γ	[°]	polovičný uhol kužeľového veka
ϑ	[m ³ ·kg ⁻¹]	merný objem pary

Zoznam skratiek

SPP	separátor – prehrievač
TG	turbogenerátor
VT	vysokotlaký diel turbíny
NT	nízkotlaký diel turbíny
VVER	vodo – vodný energetický reaktor

1 ÚVOD

Úlohou jadrovej elektrárne je čo najefektívnejšie zúžitkovať vložené palivo, pri zachovaní bezpečnej prevádzky. Jadrová elektráreň, využívajúca Clausius – Rankinov cyklus, má významnú rolu z hľadiska výroby elektrickej energie a krajiny disponujúce touto technológiou si dokážu udržať energetickú sebestačnosť. Oproti elektrárňam využívajúcim fosílnu palivá, elektrárne využívajúce jadrovú energiu nie sú producentom škodlivých emisií, ktoré nepriaznivo vplyvajú na životné prostredie. Ďalšou výhodou je energetická stálosť paliva. Jadrové palivo, najčastejšie obohatený oxid uranický, je uložený vo forme tabliet v kazetách, ktoré sú uložené v reaktore, kde sa vplyvom štiepnej reakcie zahrieva, odovzdáva teplo primárnej vode pretekajúcej reaktorom, ktorá ďalej odovzdáva teplo v parnom generátore sekundárnej vode, kde sa stáva parou ostrou. Ostrá para odovzdáva časť svojej energie vo vysokotlakom diele turbíny a prechádza do dielu nízkotlakého, kde expanduje až na tlak v kondenzátore. Pri expanzii pary v jednotlivých dieloch, sú rotorové časti turbíny uvedené do pohybu, ktoré sú vzájomne spojené na jednej osi s generátorom, kde sa mení mechanická energia na energiu elektrickú. V časti medzi VT a NT dielom turbíny však nastáva viacero problémov. Para po prechode vysokotlakým dielom obsahuje značnú vlhkosť, ktorá nepriaznivo vplyva na strojné časti, hlavne na lopatky turbíny v NT dieli, kde pôsobí korozívne aj erozívne. S vysokým obsahom vlhkosti v pracovnej pare sa zároveň znižuje účinnosť jadrovej elektrárne. Odstránenie vlhkosti a opätovný prehrev pary za účelom zvýšenia účinnosti jadrovej elektrárne je možné pomocou zariadení nazývaných separátory – prehrievače pary. Problematika separácie a prehrievania pary je riešená v nasledujúcich kapitolách.

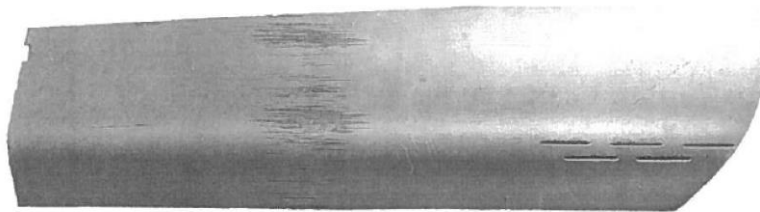
2 SEPARÁCIA VLNKOSTI Z PRACOVNEJ PARY

Vlhkosť z pracovnej pary je možné odstraňovať dvomi spôsobmi:

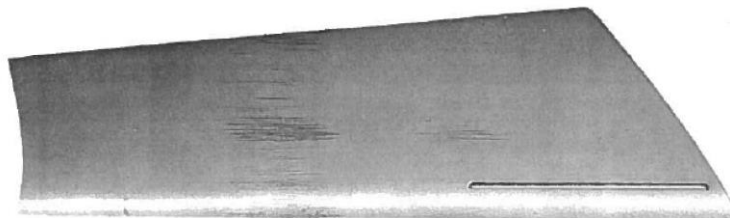
- Separáciou vlhkosti v prietochnej časti turbín
- Vonkajšou separáciou vlhkosti

2.1 Separácia vlhkosti v prietochnej časti turbín

Pre zbavovanie vlhkosti v jednotlivých stupňoch turbíny, môžu byť statorové lopatky konštruované ako duté profily s drážkami pre odvod vody z pracovnej pary. Tento systém však nie je dostatočne účinný pre požadovanú suchosť pary. Pre predstavu sú na nasledujúcom obrázku typy separačných rozvádzačích lopatiek.



Duté rozvádzačie lopatky so štrbinou pre odvádzanie vlhkosti



Obr. 1 rozvádzačie lopatky turbíny [10]

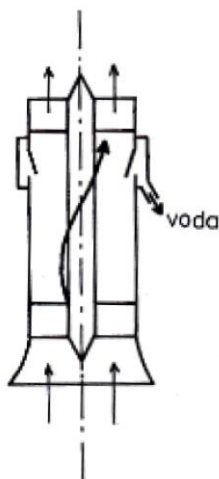
2.2 Vonkajšia separácia vlhkosti

Vlhkosť z pracovnej pary je možné efektívne odstrániť v externých separačných zariadeniach valcového tvaru, kde sa para mechanicky zbavuje vody mechanickým spôsobom. Poznáme tri základné typy separátorov:

- Cyklónové separátory
- Sitové separátory
- Žalúziové separátory

2.2.1 Cyklónové separátory

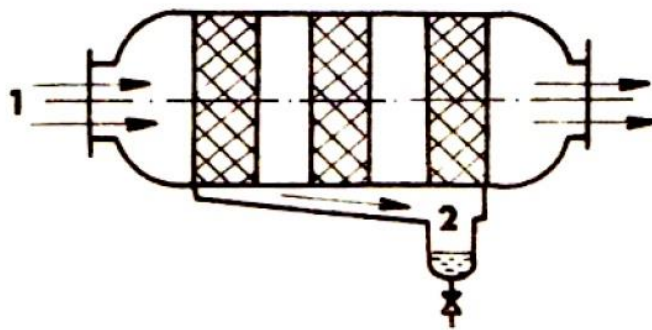
Cyklónové separátory pracujú na princípe odstredivých síl. Pracovná para vstupuje do separátora v spodnej časti, kde je vplyvom zakrivených lopatiek alebo tangenciálnych kanálov uvedená do rotácie. V dôsledku rotácie sa väčšie kvapky vylučujú na povrchu valcovej steny, kde vytvárajú vodný film a sú odvádzané štrbinami mimo separátor. Menšie kvapky sú odseparované pomocou difúzorových lopatiek, kde sa časť kinetickej energie premieňa na energiu tlakovú. Pri použití týchto lopatiek má cyklónový separátor veľkú tlakovú stratu s približne 1% vlhkosti na výstupe.



Obr. 2 princíp zbavovania vlhkosti cyklónoveho separátora

2.2.2 Sitové separátory

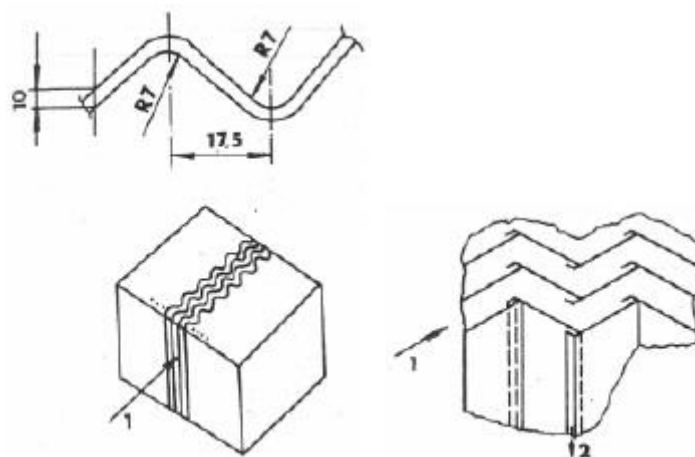
Sitové separátory sú tvorené vrstvami vodorovných alebo mierne naklonených drôtených sít. Vlhká para prechádza spodnou časťou sít rýchlosťou približne $1 - 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Kvapky vody sa zachytávajú na sítach a odkvapkávajú proti prúdu pary. Nevýhodou sitových separátorov sú veľké rozmery tohto zariadenia.



Obr. 3 princíp odlučovania vlhkosti v sitovom separátore [7]

2.2.3 Žalúziové separátory

Základnou zložkou žalúziových separátorov sú vlnité alebo šípovoroštinové nerezové plechy, usporiadané vedľa seba, ktoré vytvárajú zakrivené kanáliky pre priechod pracovnej pary. Pri prechode vlhkej pary týmito kanálíkmi sa na ich povrchu vytvára vodný film, ktorý steká smerom nadol.



Obr. 4 princíp odlučovania vlhkosti v žalúziových separátoroch [6]

3 PREHRIEVANIE PARY

Pracovná para zbavená vlhkosti v separačnej časti, ktorá je najbližšie ku krivke na medzi sýtosti, sa ďalej prehrieva parou z neregulovaného odberu VT dielu turbíny, alebo parou ostrou. Primárna voda sa z bezpečnostno – ekonomického hľadiska nevyužíva.

V prehrievačoch prúdi ohrievacia para zväzkom rúrok, kde odovzdá svoje teplo sýtej pare a skondenzuje. Pre dostatočnú ventiláciu rúrok v nich musí prúdiť väčšie množstvo pary, ako v nich stihne skondenzovať. Pre zlepšenie prestupu tepla môže byť vonkajší povrch rúrok orebrovaný. Zväzky rúrok majú dostatočne veľký dynamický odpor, ktorý zabezpečuje vyrovnanie prietoku prehrievanej pary. Z toho dôvodu je pre odvod prehrievanej pary postačujúce jedno výstupné potrubie.

Ako materiál rúrok prehrievačov sa využíva oceľ alebo zliatina meďi a niklu. Nerez sa používa veľmi málo, z dôvodu technologicko – economickej náročnosti a náchylnosti na chlór, ktorý spolu s kyslíkom v oblasti dosušovania pary spôsobuje koróziu. [6]

4 NÁVRH SEPARÁTORA – PREHRIEVAČA

Pre projekčný návrh som si vybral vertikálny žalúziový separátor vzájomne spojený s dvojstupňovým ohrevom pracovnej pary, pre turbínu Škoda, typ K 220 – 44 a tlakovodný jadrový reaktor typu VVER 440, kde a jeden reaktorový blok prislúcha jedna dvojica TG a štyri separátory – prehrievače.

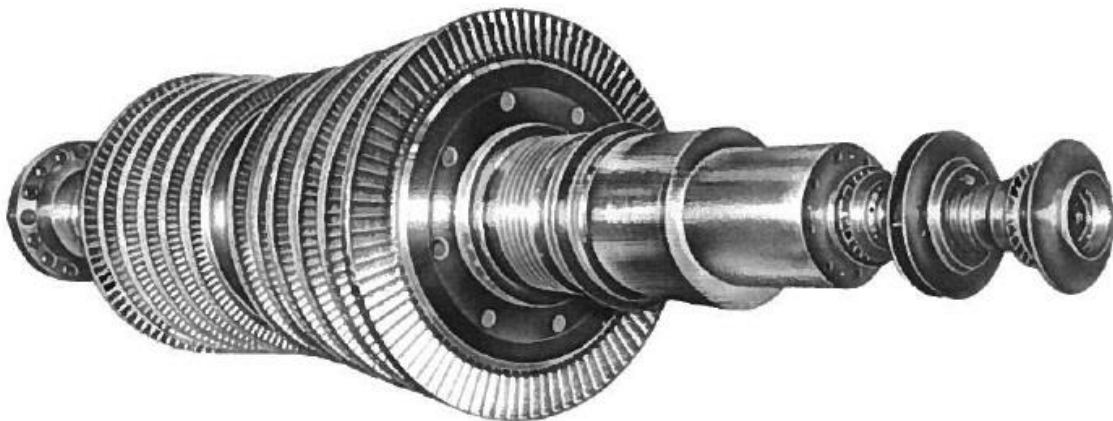
4.1 Kondenzačná parná turbína Škoda, typ K 220 – 44

Táto turbína je prevedená ako jednohriadeľová, s tromi telesami v zapojení VT, NT, NT, s odstraňovaním vlhkosti a prehrievaním pary medzi VT a NT dielom. VT diel je vybavený ôsmymi neregulovanými odbermi. Generátor a budič sú na spoločnom hriadeľi s turbínovými časťami. Telesá turbíny sú delené vo vodorovnej rovine a obe polovice telesa sú spojené skrutkami, ktoré sa povoľujú a utáhujú za tepla. Všetky tri telesá turbíny sú osovo symetrické v horizontálnej aj vertikálnej osi.

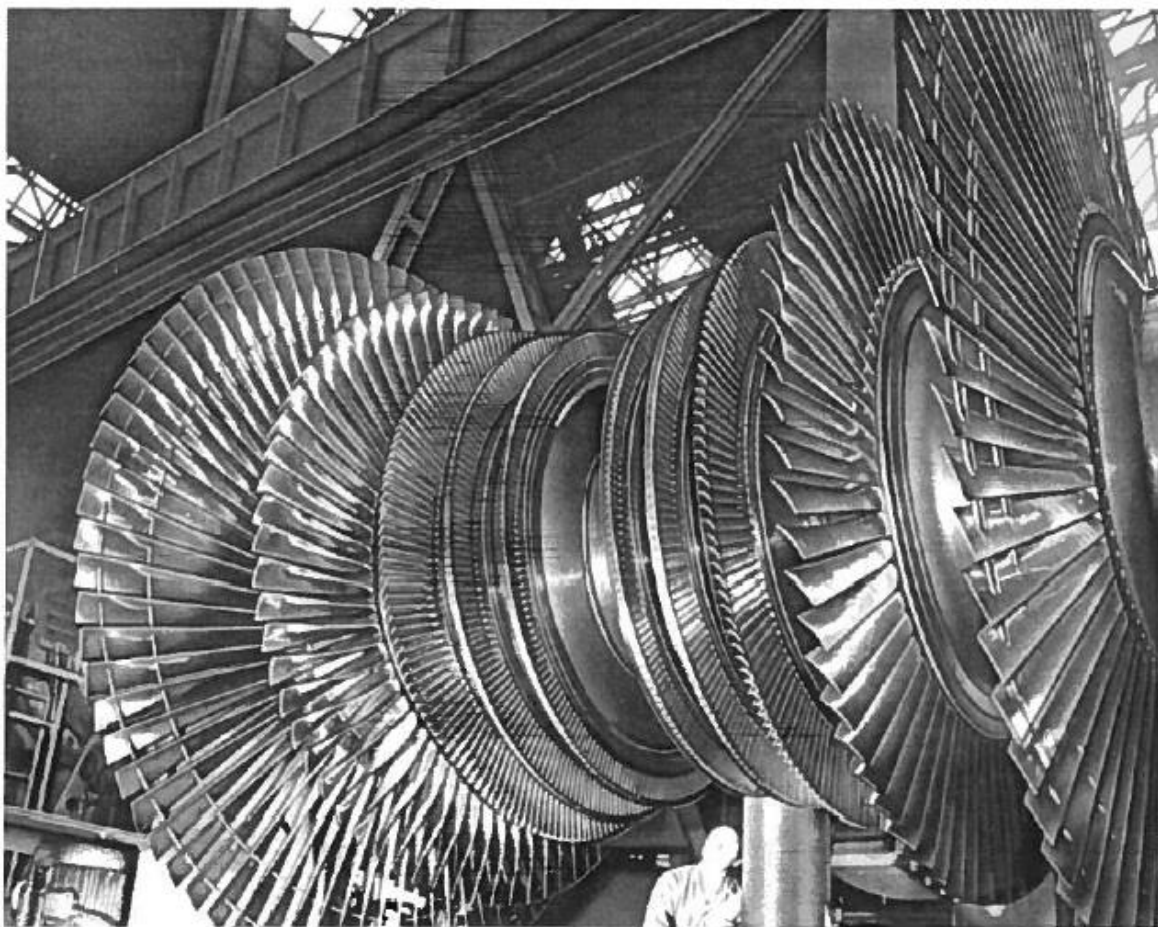
Dvojprúdové té teleso VT dielu má v každom prúde 6 stupňov, kde jeden stupeň tvorí rozvádzacie a obežné koleso. NT diel je takisto dvojprúdový a v každom prúde je

umiestnených 5 stupňov. Rotor VT dielu je celokovaný, s päťným priemerom 1050 mm.[10]

Na rotore NT dielu sú nalisované obežné kolesá, kde dĺžka poslednej lopatky obežného kolesa je 840 mm [10]



Obr. 5 VT diel turbíny [10]



Obr. 6 NT diel turbíny [10]

4.2 Separátor – prehrievač pary, typ 220 M

Separátor – prehrievač pary je určený na osušenie a prihriatie pary za vysokotlakým telesom turbíny. Na pohľad tvorí jednotelesový vertikálny aparát, ktorý obsahuje separačnú časť a dva stupne prehriatia pary. V hornej časti je umiestnený separátor a v dolnej časti dva stupne prehrievača.

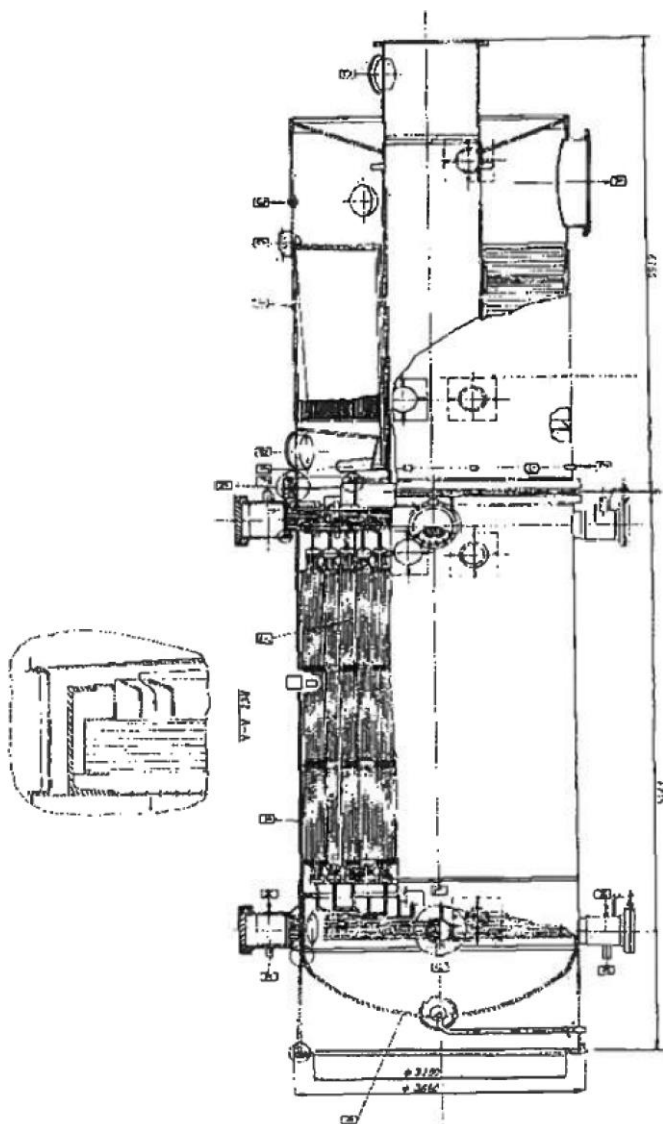
Separáčna a prehrievacia časť je vzájomne spojená prírubovým spojom s membránovým tesnením. Separátor pozostáva zo separačných blokov, uložených radiálne v kruhovom priestore medzi vonkajším plášťom a výstupným potrubím, ďalej z vnútorného kuželového kolektora, záchytného poľa a dvoch rúrok, pre odvod odseparovanej vody. Separáčny blok pozostáva z 5 separačných zväzkov, zlievacích žlabov, vypúšťacej stojky a dierovaného plechu, ktoré tvoria kostru separačného bloku. Zlievacie žlaby, umiestnené pod separačnými zväzkami, zabezpečujú odtok vody do vypúšťacej stojky. Vypúšťacia stojka separačného bloku ústi do vnútorného kuželového kolektora. Dierovaný plech, trojuholníková a závitová stena tvoria výstupný klinový kanál pre odvod odseparovanej pary. Medzery v dolnej časti separátora medzi výstupnými kanálmi susedných separačných blokov, sú zakryté šikmými vložkami, ktoré tvoria vypúšťacie pole. Medzery medzi separačnými blokmi predstavujú vstupné klinové kolektory. Separáčny zväzok pozostáva z vodiacich lopatiek a žalúzií z vlnitého plechu. Je vyrobený z nehrdzavejúcej ocele. Všetky ostatné prvky separátora sú z uhlíkatej ocele.

Prehrievač pary je vytvorený 6 – hrannými kazetami, uloženými v opornej mriežke, umiestnenej v spodnej časti aparátu. Prvý stupeň prehrievača je tvorený 94 kazetami, ktoré sú rozložené vo vonkajšej časti aparátu. V medzerách medzi kazetami I. stupňa a plášťom aparátu sú umiestnené vytesňovače. Druhý stupeň prehrievača pary je tvorený 93 kazetami, ktoré sú rozložené v strednej časti aparátu. Kazety I. a II. stupňa sú oddelené tvarovou stenou. Kazeta pozostáva z 37 pozdĺžne orebrovaných rúrok. Konce rúrok, bez orebrovania, sú upevnené v rúrkovnici. Rúrky v kazete sú oddelené štyrmi opornými mriežkami.[10]

4.2.1 Zloženie systému SPP

Systém SPP sa skladá z:

- 2 x separátor – prehrievač pary
- 1 x zberná nádrž separátu
- 2 x prečerpávacie čerpadlo separátu
- 1x zberač kondenzátu I. stupňa
- 1x zberač kondenzátu II. stupňa
- 1x expanzná nádrž
- príslušné potrubné trasy a armatúry



Obr. 7 Separátor – prehrievač pary SPP, typ 220 M [10]

5 POPIS SYSTÉMU SPP

Para z vysokotlakého dielu je privedená vstupným potrubím do hornej časti separátora, kde prúdi cez vertikálne umiestnené separačné bloky. Každý separačný blok je zložený z piatich častí, v ktorých sú umiestnené nerezové vlnité plechy naskladané vedľa seba s malým rozstupom a vzájomne spojené do jedného zväzku. Rozostupy medzi vlnitými plechmi tvoria kanáliky, v ktorých prúdi vlhká para. Vlhká para je nútená meniť smer a väčšie kvapôčky vody obsiahnuté v pare, majú menšiu rýchlosť, preto nedokážu rýchlo reagovať na zmenu smeru, narážajú do stien plechov a stekajú po nich smerom nadol do zberného prstenca a odtiaľ gravitačne do zberača separátu. Na vstupe do separačných blokov je umiestnený usmerňovač. Tento usmerňovač rozdelí prúd pary na viacero častí, čím sa zmenší prierez a zmenší odpor, zároveň navádza paru kolmo na vlnité plechy. Na výstupe je osadený dierovaný plech, kde sa odlúči ďalšia vlhkosť vplyvom urýchlenia prúdenia pary. Tento systém odlučovania vlhkosti z pary má účinnosť približne 98%. Para zbavená vlhkosti, ktorá prejde dierovaným plechom je usmernená oddeľovacím plechom do prehrievacej časti.

Prehrievaciu časť tvoria dva stupne, ktoré sú vzájomne oddelené. Prehriatie pary zabezpečujú šesťhranné kazety, ktoré sa skladajú z orebrovaných rúrok. Vykurovacím médiom I. stupňa je para odoberaná z VT dielu. Vykurovacím médiom je ostrá para. Osušená para postupuje cez medzitrubkový priestor I. stupňa prehrievača pary, kde nastáva jej konečné osušenie a čiastočné prehriatie. Pri výstupe z I. stupňa sa para rozptína a usmerňuje v dolnom eliptickom dne o 180 °C. Postupuje do II. Stupňa prehrievača, kde nastáva jej konečné prehriatie. Prehriata para z II. Stupňa postupuje cez výstupné hrdlo a je odvádzaná z SPP k nízkotlakému telesu turbíny.

Vyhrievacia para I. stupňa je z odberu vysokotlakého telesa turbíny. Vyhrievacia para z odberu VT dielu turbíny sa privádza k dvom rozvádzacím komorám I. stupňa, ktoré sú umiestnené na plášti aparátu. Para sa pomocou rúrok z komôr rozvádza do kaziet, kde kondenzuje a odovzdáva teplo prehrievanej pare. Kondenzát z kaziet sa odvádza pomocou rúrok do dvoch odvádzacích komôr I. stupňa. Vyhrievacia para II. Stupňa prehrievača je ostrá para. Vyhrievacia para sa privádza k dvom vyhrievacím komorám II. Stupňa, z ktorých sa rúrkami rozvádza do kaziet. Kondenzát z kaziet sa odvádza rúrkami do dvoch odvádzacích komôr II. Stupňa.

6 VÝPOČET ŽALÚZIOVÉHO SEPARÁTORA

Zadané hodnoty

$\dot{m}_v = 500\,000$ $\dot{m}_v = 138,889$	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	Množstvo vlhkej pary na vstupe
$x_1 = 0,87$	1	Suchosť vlhkej pary
$x_1 = 0,99$	1	Suchosť pary po separácii
$\dot{m}_1 = 435\,000$ $\dot{m}_1 = 120,833$	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	Množstvo pary na výstupe zo separátora

Konstrukčné konštanty

$h = 0,45$	m	Výška žalúzie
$b = 1,45$	m	Šírka žalúzie
$t = 0,01$	m	Rozteč žalúzií
$b_{r\check{z}} = 0,195$	m	Rozvinutá šírka žalúzie
$\alpha = 48$	°	Polovica uhla zakrivenia
$n_s = 5$	1	Počet separačných sekcií
$g = 9,81$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Gravitačné zrýchlenie
$n = 12$	1	Počet separačných blokov
$K = 2,5$	1	Maximálne zaťaženie separátora
$\xi_{sb} = 12$	1	Koeficient tlakovej straty separačného bloku, podľa [8]

Fyzikálne konštanty

$\rho_{mp} = 2,0287$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Hustota mokrej pary na vstupe
$\rho'' = 1,765$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Hustota sýtej pary
$\rho' = 929,63$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Hustota sýtej vody
$\vartheta'' = 0,566$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Merný objem sýtej pary

- **Vstupná plocha separačných blokov**

$$S_{sb} = h \cdot b \cdot n \cdot n_s \quad (1)$$

$$S_{sb} = 0,45 \cdot 1,45 \cdot 12 \cdot 5$$

$$S_{sb} = 39,15 \text{ m}^2$$

- **Kutateladzeho kritérium pre kritickú rýchlosť na vertikálnych žalúziách**

$$Ku = c - 1,69 \cdot \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h \cdot t}{b} \right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \quad (2)$$

$$Ku = 2,5 - 1,69 \cdot \left(\frac{1-0,87}{0,87} \right)^{0,56} \cdot \left(\frac{0,45 \cdot 0,01}{0,195} \right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos 48}$$

$$Ku = 2,854879 \doteq 2,855 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Povrchové napätie vody – Bošinský**

$$\sigma = c_\sigma \cdot g \cdot \left(\frac{\rho' - \rho''}{1000} \right)^4 \quad (3)$$

$$\sigma = 0,07 \cdot 10^{-12} \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{929,63 - 1,765}{1000} \right)^4$$

- **Kritická rýchlosť na žalúziách – Kutateladze**

$$w_{kr} = Ku \cdot \frac{\sqrt[4]{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}}{\sqrt{\rho''}} \quad (4)$$

$$w_{kr} = Ku \cdot \frac{\sqrt[4]{9,81 \cdot 0,051688 \cdot (929,63 - 1,765)}}{\sqrt{1,765}}$$

$$w_{kr} = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Doporučená vstupná rýchlosť pary do separátora**

$$w_{sep(dop)} = (0,2 \div 0,7) \cdot w_{kr} \quad (5)$$

$$w_{sep(dop)} = (0,2 \div 0,7) \cdot 10$$

$$w_{sep(dop)} = 2 \div 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Prietokná plocha separátora – doporučená**

$$S_{\text{sep(dop)}} = \frac{\dot{m}_{\text{vp}}}{w_{\text{dop}} \cdot \rho''} \quad (6)$$

$$S_{\text{sep(dop)}} = \frac{138,889}{(2 \div 7) \cdot 1,765}$$

$$S_{\text{sep(dop)}} = 11,24 \div 39,35 \text{ m}^2$$

Prietočná plocha 39,15 m² pre 12 separačných blokov vyhovuje doporučeným hodnotám. Prietočná plocha jedného separačného bloku je 3,2625 m².

- **Pracovná vstupná rýchlosť do separátora**

$$w_{\text{vs}} = \frac{\dot{m}_{\text{v}}}{S_{\text{sep}} \cdot \rho''} \quad (7)$$

$$w_{\text{vs}} = \frac{138,889}{39,15 \cdot 1,765}$$

$$w_{\text{vs}} = 1,5075 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Tlaková strata pary pri prechode separačnými blokmi**

$$\Delta p_{sb} = \xi \cdot \frac{w_{\text{sep}}^2}{2} \cdot \rho_{\text{mp}} \quad (8)$$

$$\Delta p_{sb} = 12 \cdot \frac{1,5075^2}{2} \cdot 2,0287$$

$$\Delta p_{sb} = 27,66 \text{ Pa}$$

Tlaková strata separačného bloku je veľmi malá, preto je možné ju zanedbať.

7 TEPELNÝ VÝPOČET

Tepelný výpočet má za cieľ určiť veľkosti teplovýmenných plôch SPP pre priechod prehrievacej pary I. a II. stupňa prehrievača a navrhnutie základných rozmerov aparátu. V závere výpočtu je určený koeficient rezervnej plochy kazety prehrievača oboch stupňov. Koeficient rezervnej plochy slúži pre prípadné zaslepovanie rúrok vplyvom vonkajšej netesnosti a musí dosahovať hodnotu aspoň 10%. Pri výpočte vychádzam predovšetkým z literatúry [3] a [5]

7.2 Hodnoty potrebné pre výpočet

- **Zadané hodnoty**

$p_1 = 0,3$	[Mpa]	Tlak prehrievanej pary na vstupe do I. stupňa
$t_1 = 136$	[°C]	Teplota prehrievanej pary na vstupe do I. stupňa
$p_2 = 0,284$	[Mpa]	Tlak prehrievanej pary na výstupe z I. stupňa
$t_2 = 186,2$	[°C]	Teplota prehrievanej pary na vstupe do I. stupňa
$p_4 = 1,8$	[Mpa]	Tlak prehrievacej pary pre I. stupeň
$t_4 = 218$	[°C]	Teplota prehrievacej pary pre I. stupeň
$m_1 = 120,83$	[kg·s ⁻¹]	Množstvo pary vystupujúcej zo separátora

- **Entalpie pary a kondenzátu odčítané z parných tabuliek**

$i_1 = 2751$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpia prehrievanej pary I. stupňa – vstup
2853	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpia prehrievanej pary I. stupňa – výstup
$i_4 = 2911$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpia prehrievacej pary I. stupňa
$i_5 = 859$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpia kondenzátu prehrievacej pary I. stupňa

- **Fyzikálne konštanty odčítané z parných tabuliek**

$\eta = 122,69$	$[\text{N.s.m}^{-2}]$	Dynamická viskozita kondenzátu I. stupňa
$l_{v1} = 1866,04$	$[\text{kJ.kg}^{-1}]$	Výparné teplo kondenzátu I. stupňa
$Pr_{k2} = 0,866$	$[1]$	Prandtlovo kritérium kondenzátu I. stupňa
$\lambda_{k1} = 0,6512$	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	Tepelná vodivosť kondenzátu I. stupňa
$\vartheta'_{1str} = 0,001186$	$[\text{m}^3.\text{kg}^{-1}]$	Merný objem sýtej kvapaliny I. stupňa
$\vartheta''_{1str} = 0,08944$	$[\text{m}^3.\text{kg}^{-1}]$	Merný objem sýtej pary I. stupňa

7.1 Tepelný výpočet I. stupňa prehrievača

- **Tepelný výkon I. stupňa**

$$Q_1 = \dot{m}_1 \cdot (i_2 - i_1) \quad (9)$$

$$Q_1 = 120,83 \cdot (2816,7 \cdot 10^3 - 2730,46 \cdot 10^3)$$

$$Q_1 = 10,42 \text{ MW}$$

- **Množstvo ohrievajúcej pary I. stupňa**

$$\dot{m}_4 = \frac{Q_1}{(i_3 - i_4)} \quad (10)$$

$$\dot{m}_4 = \frac{10,42 \cdot 10^6}{(2827,76 \cdot 10^3 - 934,41 \cdot 10^3)}$$

$$\dot{m}_4 = 5,50 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 19800 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

- **Stredný logaritmický tepelný spád I. stupňa prehrievača**

$$\Delta t_1 = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{t_4 - t_1}{t_4 - t_2}} \quad (11)$$

$$\Delta t_1 = \frac{176 - 136}{\ln \frac{218 - 136}{218 - 176}}$$

$$\Delta t_1 = 59,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- **Stredný tlak a teplota I. stupňa prehrievača**

$$p_{1str} = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (12)$$

$$p_{1str} = \frac{0,3 + 0,295}{2}$$

$$p_{1str} = 0,2975 \text{ MPa}$$

$$t_{1str} = t_3 - \Delta t_1 \quad (13)$$

$$t_{1str} = 218 - 59,8$$

$$t_{1str} = 158,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

konštrukčné konštanty

$d_1 = 0,016$	[m]	Vonkajší priemer orebrovanej rúrky
$d_2 = 0,012$	[m]	Vnútorý priemer orebrovanej rúrky
$h = 0,0085$	[m]	Výška rebra
$n = 12$	[1]	Počet rebier na jednej rúrke
$l = 0,0212$	[m]	Rozvin koryta vytvoreného rebrami
$\delta = 0,0008$	[m]	Hrúbka rebra
$z = 37$	[1]	Počet rúrok v jednej kazete
$z_1 = 94$	[1]	Počet kaziet I. stupňa
$l_k = 0,129$	[m]	Teoretická strana kazety
$L_r = 2,4$	[m]	Dĺžka orebrovanej časti rúrky

- **Teoretický prierez kazety**

$$S_{kt} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot l_k^2 \quad (14)$$

$$S_{kt} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot 0,129^2$$

$$S_{kt} = 0,043 \text{ m}^2$$

- **Skutočný prierez kazety pre priechod prehrievanej pary**

$$S_{ks} = S_{kt} - \frac{\pi \cdot d_1^2}{2} \cdot z - l \cdot \delta \cdot z \cdot \frac{n}{2} - 3 \cdot f_c \quad (15)$$

$$S_{ks} = 0,043 - \frac{\pi \cdot 0,016^2}{2} \cdot 37 - 0,212 \cdot 0,0008 \cdot 37 \cdot \frac{12}{2} - 3 \cdot 0,000161$$

$$S_{ks} = 0,03154 \text{ m}^2$$

kde:

$f_c = 0,000152 \text{ [m}^2\text{]}$... prierez krycích plechov kazety, vypočítaný v programe ivnmentor

- **Počet rúrok v I. stupni**

$$n_{rI.} = z \cdot z_1 \quad (16)$$

$$n_{rI.} = 37 \cdot 94$$

$$n_{rI.} = 3478$$

- **Obmývaný obvod I. stupňa**

$$u_I = (l + \delta) \cdot n \cdot n_{rI} + u_{p1} + u_{d1} \cdot z_1 \quad (17)$$

$$u_I = (0,0212 + 0,0008) \cdot 12 \cdot 3478 + 14,541 + 0,301 \cdot 94$$

$$u_I = 961,03 \text{ m}$$

kde:

$u_{p1} = 14,541 \text{ m}$... obmývaný obvod prepážiek, vypočítaný v programe ivnmentor

$u_{d1} = 0,301 \text{ m}$... obmývaný obvod dosiek, vypočítaný v programe ivnmentor

- **Ekvivalentný priemer kazety pre I. stupeň**

$$d_{eI} = \frac{4 \cdot S_{ks} \cdot z_1}{u_I} \quad (18)$$

$$d_{eI} = \frac{4 \cdot S_{ks} \cdot z_1}{u_I}$$

$$d_{eI} = 0,0123 \text{ m}^2$$

- **Stredná rýchlosť prehrievanej pary I. stupňa**

$$w_{1\text{str}} = \frac{\dot{m}_1 \cdot \vartheta_{1\text{str}}}{z_1 \cdot S_{\text{ks}}} \quad (19)$$

$$w_{1\text{str}} = \frac{\dot{m}_1 \cdot 0,6557}{94 \cdot 0,03154}$$

$$w_{1\text{str}} = 26,72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Stredná hodnota Reynoldsovo kritéria prehrievanej pary I. stupňa**

$$\text{Re}_{I(\text{str})} = \frac{w_{1\text{str}} \cdot d_{e1}}{v_{1\text{str}}} \quad (20)$$

$$\text{Re}_{I(\text{str})} = \frac{26,72 \cdot 0,0123}{9,45 \cdot 10^{-6}}$$

$$\text{Re}_{I(\text{str})} = 34778,4$$

- **Stredná hodnota Nusseltovho kritéria prehrievanej pary I. stupňa**

$$\text{Nu}_{I(\text{str})} = 0,023 \cdot \text{Re}_{1\text{str}}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{1\text{str}}^{0,4} \quad (21)$$

$$\text{Nu}_{I(\text{str})} = 0,023 \cdot 34778,4^{0,8} \cdot 0,996^{0,4}$$

$$\text{Nu}_{I(\text{str})} = 98,646$$

- **Teoretická hodnota súčiniteľa prestupu tepla prehrievanej pary I. stupňa**

$$\alpha_{I,t} = \frac{\text{Nu}_{1\text{str}} \cdot \lambda_{1\text{str}}}{d_{e1}} \quad (22)$$

$$\alpha_{I,t} = \frac{98,646 \cdot 0,0307959}{0,0123}$$

$$\alpha_{I,t} = 246,98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- **Skutočná hodnota súčiniteľa prestupu tepla prehrievanej pary I. stupňa**

$$\alpha_{Is} = \left(\frac{S_r}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S} \right) \cdot \frac{\alpha_{1t} \cdot \Psi}{1 + \varepsilon \cdot \Psi \cdot \alpha_{1t}} \quad (23)$$

$$\alpha_{Is} = (0,81 \cdot 0,79 \cdot 1 + 0,19) \cdot \frac{246,98 \cdot 0,9}{1 + 0 \cdot 0,9 \cdot 246,98}$$

$$\alpha_{Is} = 184,47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\frac{S_r}{S} = \frac{2 \cdot h + \delta}{1 + \delta} = \frac{2 \cdot 0,0085 + 0,0008}{0,0212 + 0,0008} = 0,81$$

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_r}{S} = 1 - 0,81 = 0,19$$

S_r ... plocha rebier I. stupňa

S_h ... plocha hladkej časti rúrok I. stupňa

S ... plocha orebrovanej časti rúrky I. stupňa

E ... koeficient efektívnosti rebra I. stupňa, $E = 0,79$

μ ... koeficient rozšírenia rebra, $\mu = 1$

Ψ ... koeficient nerovnomernosti prechodu tepla na povrchu rebra, $\Psi = 0,9$

ε ... koeficient znečistenia, $\varepsilon = 0$

- **Stredná hodnota merného tepelného toku I. stupňa**

$$q_{I(str)} = \frac{Q_1}{\pi \cdot d_2 \cdot n_2 \cdot L_r} \quad (24)$$
$$q_{I(str)} = \frac{10,42 \cdot 10^6}{\pi \cdot 0,012 \cdot 3478 \cdot 2,4}$$
$$q_{I(str)} = 33112,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

- **Reynoldsovo kritérium prehrievajúcej pary I. stupňa**

$$Re_1 = \frac{2 \cdot q_{1str} \cdot L_r}{\mu_1 \cdot l_{v1}} \quad (25)$$
$$Re_1 = \frac{2 \cdot 33112,8 \cdot 2,4}{(122,69 \cdot 10^{-6}) \cdot (1866 \cdot 10^3)}$$
$$Re_1 = 694,25$$

- **Nusseltovo kritérium prehrievajúcej pary I. stupňa**

$$Nu_1 = 0,14 \cdot Re_1^{0,7} \cdot Pr_{k1}^{0,35} \cdot \left(\frac{\vartheta_1''}{\vartheta_1'} \right)^{0,35} \quad (26)$$
$$Nu_1 = 0,14 \cdot 694,25^{0,7} \cdot 0,866^{0,35} \cdot \left(\frac{0,08944}{0,001186} \right)^{0,35}$$
$$Nu_1 = 58,94$$

- **Súčiniteľ prestupu tepla prehrievacej pary I. stupňa**

$$\alpha_{IN} = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_{k1}}{d_2} \quad (27)$$

$$\alpha_{IN} = \frac{59,94 \cdot 0,6512}{0,012}$$

$$\alpha_{IN} = 3198,5 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

- **Prestup tepla v I. stupni**

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1S} \cdot \varphi} + \frac{\delta \cdot d_1}{\lambda_{Im} \cdot d_{str}} + \frac{d_1}{\alpha_{1N} \cdot d_2}} \quad (28)$$

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{184,47 \cdot 5,25} + \frac{0,0008 \cdot 0,016}{44,69 \cdot 0,014} + \frac{0,016}{3198,5 \cdot 0,012}}$$

$$k_1 = 696,06 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

Kde tepelná vodivosť orebrovaných rúrok, akosti 12 022.1: $\lambda_{Im} = 44,69 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

- **Koeficient orebrovania**

$$\varphi = \frac{\pi \cdot d_1 + (2 \cdot h + \delta) \cdot n}{\pi \cdot d_1} \quad (29)$$

$$\varphi = \frac{\pi \cdot 0,016 + (2 \cdot 0,0085 + 0,0008) \cdot 12}{\pi \cdot 0,016}$$

$$\varphi = 5,25$$

- **Stredný priemer orebrovanej rúrky**

$$d_{str} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (30)$$

$$d_{str} = \frac{0,016 + 0,012}{2}$$

$$d_{str} = 0,014$$

- **Výpočtová plocha ohrevu**

$$H_{1v} = \frac{10,42 \cdot 10^6}{696,06 \cdot 59,8} \quad (31)$$

$$H_{1v} = \frac{Q_1}{k_1 \cdot \Delta t_1}$$

$$H_{1v} = 250,3 \text{ m}^2$$

- **Výpočtová dĺžka orebrovanej rúrky**

$$L_{1v} = \frac{H_{1v}}{n_1 \cdot \pi \cdot d_1} \quad (32)$$

$$L_{1v} = \frac{250,3}{3478 \cdot \pi \cdot 0,016}$$

$$L_{1v} = 1,43 \text{ m}$$

- **Skutočná ohrevná plocha I. stupňa**

$$H_{2s} = n_1 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L_r \quad (33)$$

$$H_{2s} = 3478 \cdot \pi \cdot 0,016 \cdot 2,4$$

$$H_{2s} = 367,13 \text{ m}^2$$

- **Koeficient rezervnej plochy**

$$k_{r1} = \frac{H_{2s} - H_{2v}}{H_{2v}} \cdot 100 \quad (34)$$

$$k_{r1} = \frac{367,13 - 250,3}{367,13} \cdot 100$$

$$k_{r1} = 31,82 \%$$

7.3 Hodnoty potrebné pre výpočet II. stupňa

Konstrukčné konštanty

$p_2 = 0,295$	[Mpa]	Tlak prehrievanej pary na vstupe do II. stupňa
$t_2 = 176$	[°C]	Teplota prehrievanej pary na vstupe do II. stupňa
$p_3 = 0,290$	[Mpa]	Tlak prehrievanej pary na výstupe z II. stupňa
$t_4 = 216$	[°C]	Teplota prehrievanej pary na výstupe z II. stupňa
$p_4 = 4,3$	[Mpa]	Tlak prehrievacej pary pre II. stupeň
$t_4 = 270$	[°C]	Teplota prehrievacej pary pre II. stupeň
$m_1 = 120,83$	[kg·s ⁻¹]	Množstvo vlhkej pary vystupujúcej zo separátora

Entalpie pary odčítané z parných tabuliek

$i_2 = 2816,7$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpia prehrievanej pary II. stupňa – vstup
$i_5 = 2899,36$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpia prehrievanej pary II. stupňa – výstup
$i_6 = 2856,76$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpia prehrievacej pary II. stupňa
$i_7 = 1185,09$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpia kondenzátu prehrievacej pary II. stupňa

Fyzikálne konštanty

$\eta = 97,49$	[N.s.m ⁻²]	Dynamická viskozita kondenzátu II. stupňa
$l_{vII} = 1604,6$	[kJ·kg ⁻¹]	Výparné teplo kondenzátu II. stupňa
$Pr_{k2} = 0,824$	[1]	Prandtlovo kritérium kondenzátu II. stupňa
$\lambda_{k1} = 0,60538$	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelná vodivosť kondenzátu II. stupňa
$\vartheta'_{1str} = 0,001186$	[m ³ ·kg ⁻¹]	Merný objem sýtej kvapaliny II. stupňa
$\vartheta''_{1str} = 0,08944$	[m ³ ·kg ⁻¹]	Merný objem sýtej pary II. stupňa

7.4 Tepelný výpočet II. stupňa prehrievača

- **Tepelný výkon II. stupňa**

$$Q_{II} = \dot{m}_1 \cdot (i_2 - i_1) \quad (35)$$

$$Q_{II} = 120,83 \cdot (2899,36 \cdot 10^3 - 2816,7 \cdot 10^3)$$

$$Q_{II} = 9,99 \text{ MW}$$

- **Množstvo ohrievajúcej pary II. stupňa**

$$\dot{m}_4 = \frac{Q_1}{(i_3 - i_4)} \quad (36)$$

$$\dot{m}_4 = \frac{9,99 \cdot 10^6}{(2856,76 \cdot 10^3 - 11,85,09 \cdot 10^3)}$$

$$\dot{m}_4 = 5,976 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 21513,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

- **Stredný logaritmický tepelný spád II. stupňa prehrievača**

$$\Delta t_1 = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{t_4 - t_1}{t_4 - t_2}} \quad (37)$$

$$\Delta t_1 = \frac{216 - 176}{\ln \frac{270 - 176}{270 - 166}}$$

$$\Delta t_1 = 72,16 \text{ }^\circ\text{C}$$

- **Stredný tlak a teplota II. stupňa prehrievača**

$$p_{I(\text{str})} = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (38)$$

$$p_{I(\text{str})} = \frac{0,295 + 0,2904}{2}$$

$$p_{I(\text{str})} = 0,2927 \text{ MPa}$$

$$t_{I(\text{str})} = t_3 - \Delta t_1 \quad (39)$$

$$t_{I(\text{str})} = 270 - 72,16$$

$$t_{I(\text{str})} = 197,84 \text{ }^\circ\text{C}$$

konštrukčné konštanty

$d_1 = 0,016$	[m]	Vonkajší priemer orebrovanej rúrky
$d_2 = 0,012$	[m]	Vnútorý priemer orebrovanej rúrky
$h = 0,0085$	[m]	Výška rebra
$n = 12$	[1]	Počet rebier na jednej rúrke
$l = 0,0212$	[m]	Rozvin koryta vytvoreného rebrami
$\delta = 0,0008$	[m]	Hrúbka rebra
$z = 37$	[1]	Počet rúrok v jednej kazete
$z_1 = 93$	[1]	Počet kaziet II. stupňa
$l_k = 0,129$	[m]	Teoretická strana kazety
$L_r = 2,4$	[m]	Dĺžka orebrovanej časti rúrky

- **Počet rúrok v II. stupni**

$$n_{r1} = z \cdot z_{II} \quad (40)$$

$$n_{r1} = 37 \cdot 93$$

$$n_{r1} = 3441$$

- **Obmývaný obvod II. stupňa**

$$u_{II} = (l + \delta) \cdot n \cdot n_{r1} + u_{pII} + u_{dII} \cdot z_{II} \quad (41)$$

$$u_{II} = (0,0212 + 0,0008) \cdot 12 \cdot 3441 + 14,541 + 0,301 \cdot 93$$

$$u_{II} = 951,26 \text{ m}$$

Kde:

$$u_{pI} = u_{pII}$$

$$u_{dI} = u_{dII}$$

- **Ekvivalentný priemer kazety pre II. stupeň**

$$d_{eII} = \frac{4 \cdot S_{ks} \cdot z_{II}}{u_{II}} \quad (42)$$

$$d_{eII} = \frac{4 \cdot S_{ks} \cdot 93}{951,26}$$

$$d_{eII} = 0,0124 \text{ m}$$

- **Stredná rýchlosť prehrievanej pary II. stupňa**

$$w_{II(str)} = \frac{\dot{m}_1 \cdot \vartheta_{II(str)}}{z_2 \cdot S_{ks}} \quad (43)$$

$$w_{II(str)} = \frac{\dot{m}_1 \cdot 0,7406}{z_2 \cdot S_{ks}}$$

$$w_{II(str)} = 30,48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Stredná hodnota Reynoldsovo kritéria prehrievanej pary II. stupňa**

$$Re_{II(str)} = \frac{w_{II(str)} \cdot d_{eII}}{v_{1str}} \quad (44)$$

$$Re_{II(str)} = \frac{30,48 \cdot 0,0124}{11,87 \cdot 10^{-6}}$$

$$Re_{II(str)} = 31840,9$$

- **Stredná hodnota Nusseltovho kritéria prehrievanej pary II. stupňa**

$$Nu_{II(str)} = 0,023 \cdot Re_{II(str)}^{0,8} \cdot Pr_{II(str)}^{0,4} \quad (45)$$

$$Nu_{II(str)} = 0,023 \cdot 31840,9^{0,8} \cdot 0,971^{0,4}$$

$$Nu_{II(str)} = 90,99$$

- **Teoretická hodnota súčiniteľa prestupu tepla prehrievanej pary II. stupňa**

$$\alpha_{II t} = \frac{Nu_{II(str)} \cdot \lambda_{II(str)}}{d_{eII}} \quad (46)$$

$$\alpha_{II t} = \frac{90,99 \cdot 0,03386}{0,0124}$$

$$\alpha_{II t} = 248,46 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

- **Skutočná hodnota súčiniteľa prestupu tepla prehrievanej pary II. stupňa**

$$\alpha_{II s} = \left(\frac{S_r}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S} \right) \cdot \frac{\alpha_{II t} \cdot \Psi}{1 + \varepsilon \cdot \Psi \cdot \alpha_{II t}} \quad (47)$$

$$\alpha_{II s} = (0,81 \cdot 0,79 \cdot 1 + 0,19) \cdot \frac{248,46 \cdot 0,9}{1 + 0 \cdot 0,9 \cdot 248,46}$$

$$\alpha_{II s} = 185,58 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\frac{S_r}{S} = \frac{2 \cdot h + \delta}{1 + \delta} = \frac{2 \cdot 0,0085 + 0,0008}{0,0212 + 0,0008} = 0,81$$

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_r}{S} = 1 - 0,81 = 0,19$$

S_r ... plocha rebier I. stupňa

S_h ... plocha hladkej časti rúrok I. stupňa

S ... plocha orebrovanej časti rúrky I. stupňa

E ... koeficient efektívnosti rebra I. stupňa, $E = 0,79$

μ ... koeficient rozšírenia rebra, $\mu = 1$

Ψ ... koeficient nerovnomernosti prestupu tepla na povrchu rebra, $\Psi = 0,9$

ε ... koeficient znečistenia, $\varepsilon = 0$

- **Stredná hodnota merného tepelného toku II. stupňa**

$$q_{I(str)} = \frac{Q_1}{\pi \cdot d_2 \cdot n_2 \cdot L_r} \quad (48)$$

$$q_{I(str)} = \frac{9,99 \cdot 10^6}{\pi \cdot 0,012 \cdot 3441 \cdot 2,4}$$

$$q_{I(str)} = 3208707 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

- **Reynoldsovo kritérium prehrievajúcej pary II. stupňa**

$$Re_{II} = \frac{2 \cdot q_{II(str)} \cdot L_r}{\mu_{II} \cdot l_{vII}} \quad (49)$$

$$Re_{II} = \frac{2 \cdot 32087,7 \cdot 2,4}{(97,5 \cdot 10^{-6}) \cdot (1604,6 \cdot 10^3)}$$

$$Re_{II} = 948,48$$

- **Nusseltovo kritérium prehrievajúcej pary II. stupňa**

$$Nu_{II} = 0,14 \cdot Re_1^{0,7} \cdot Pr_{k1}^{0,35} \cdot \left(\frac{\vartheta''_{II}}{\vartheta'_{II}} \right)^{0,35} \quad (50)$$

$$Nu_{II} = 0,14 \cdot 948,48^{0,7} \cdot 0,824^{0,35} \cdot \left(\frac{0,0356}{0,001303} \right)^{0,35}$$

$$Nu_{II} = 50,51$$

- **Súčiniteľ prestupu tepla prehrievacej pary II. stupňa**

$$\alpha_{IIN} = \frac{Nu_{II} \cdot \lambda_{kII}}{d_2} \quad (51)$$

$$\alpha_{IIN} = \frac{50,51 \cdot 0,60538}{0,012}$$

$$\alpha_{IIN} = 2548,15 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

- **Prestup tepla v II. stupni**

$$k_{II} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{IIS} \cdot \varphi} + \frac{\delta \cdot d_1}{\lambda_{Im} \cdot d_{str}} + \frac{d_1}{\alpha_{IIN} \cdot d_2}} \quad (52)$$

$$k_{II} = \frac{1}{\frac{1}{158,58 \cdot 5,25} + \frac{0,0008 \cdot 0,016}{44,22 \cdot 0,014} + \frac{0,016}{2548,15 \cdot 0,012}}$$

$$k_{II} = 572,72 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

Kde tepelná vodivosť orebrovaných rúrok, akosti 12 022.1: $\lambda_{Im} = 44,22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

- **Koeficient orebrovania**

$$\varphi = \frac{\pi \cdot d_1 + (2 \cdot h + \delta) \cdot n}{\pi \cdot d_1} \quad (53)$$

$$\varphi = \frac{\pi \cdot 0,016 + (2 \cdot 0,0085 + 0,0008) \cdot 12}{\pi \cdot 0,016}$$

$$\varphi = 5,25$$

- **Stredný priemer**

$$d_{str} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (54)$$

$$d_{str} = \frac{0,016 + 0,012}{2}$$

$$d_{str} = 0,014 \text{ m}$$

- **Výpočtová plocha ohrevu**

$$H_{IIv} = \frac{Q_{II}}{k_{II} \cdot \Delta t_{II}} \quad (55)$$

$$H_{IIv} = \frac{9,99 \cdot 10^6}{572,72 \cdot 72,16}$$

$$H_{IIv} = 241,73 \text{ m}^2$$

- **Výpočtová dĺžka orebrovanej rúrky**

$$L_{IIv} = \frac{H_{IIv}}{n_{II} \cdot \pi \cdot d_1} \quad (56)$$

$$L_{IIv} = \frac{241,73}{3441 \cdot \pi \cdot 0,016}$$

$$L_{IIv} = 1,4 \text{ m}$$

- **Skutočná ohrevná plocha II. stupňa**

$$H_{II s} = n_{II} \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L_r \quad (57)$$

$$H_{II s} = 3441 \cdot \pi \cdot 0,016 \cdot 2,4$$

$$H_{II s} = 415,1 \text{ m}^2$$

- **Koeficient rezervnej plochy**

$$k_{rII} = \frac{H_{II s} - H_{II v}}{H_{II s}} \cdot 100 \quad (58)$$

$$k_{rII} = \frac{415,1 - 241,73}{415,1} \cdot 100$$

$$k_{rII} = 41,77 \%$$

8 HYDRAULICKÝ VÝPOČET

Konštanty pary

$\dot{m}_{vp} = 138,889$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Množstvo vlhkej pary
$\dot{m}_I = 120,83$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Množstvo pary na výstupe zo separátora
$\vartheta_{I(\text{str})} = 0,6557$	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	Stredný merný objem prehrievanej pary I. stupňa
$\nu_{I(\text{str})}$		Stredná kinematická viskozita prehrievanej pary I. stupňa
$\rho_{vp} = 2,0287$		Hustota vlhkej pary na vstupe do I. stupňa
$\rho_I'' = 1,765$		Hustota sýtej pary na vstupe do I. stupňa
$\vartheta_{II(\text{str})} = 0,7406$	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	Stredný merný objem prehrievanej pary II. stupňa
$\nu_{II(\text{str})}$		Stredná kinematická viskozita prehrievanej pary II. stupňa
$\vartheta_{I(\text{výst})} = 0,7602$	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	Merný objem prehrievanej pary na výstupe z I. stupňa
$\vartheta_{IIv} = 0,7818$	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	Merný objem prehrievanej pary na výstupe z II. stupňa

8.1 PRIEREZY PRE PRIECHOD PREHRIEVANEJ PARY

- **Prierez prírodného potrubia**

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \quad (59)$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot 1,2^2}{4}$$

$$S_1 = 1,131 \text{ m}^2$$

- **Teoretický prierez kazety**

$$S_2 = 0,04323 \text{ m}^2 - \text{vzťah (15)} \quad (60)$$

- **Skutočný prierez hlavice**

$$S_n = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \quad (61)$$

$$S_n = \frac{\pi \cdot 0,159^2}{4}$$

$$S_n = 0,01985 \text{ m}^2$$

- **Prierez medzi hlavicou**

$$S_3 = S_2 - S_n \quad (62)$$

$$S_3 = 0,04323 - 0,01985$$

$$S_3 = 0,02338 \text{ m}^2$$

- **Skutočný prierez neorebrovaných častí rúrok kazety**

$$S_4 = S_2 - \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \cdot z \quad (63)$$

$$S_4 = 0,04323 - \frac{\pi \cdot 0,016^2}{4} \cdot 37$$

$$S_4 = 0,0358 \text{ m}^2$$

- **Skutočný prierez cez distančnú mrežu kazety**

$$S_5 = 0,0275 \text{ m}^2 - \text{vypočítané v programe INVENTOR} \quad (64)$$

- **Skutočný prierez cez podpernú mrežu na 1 kazetu**

$$S_5 = 0,02763 \text{ m}^2 - \text{vypočítané v programe INVENTOR} \quad (65)$$

Na základe vypočítaných prierezov boli určené koeficienty tlakových strát, podľa literatúry [5].

8.2 Koeficienty tlakových strát

$\xi = 1,1$	Koeficient strát pary na vstupnej komory
$\xi = 0,99$	Koeficient strát separátora
$\xi = 0,21$	Koeficient strát pary na vstupe do hlavice kazety
$\xi = 0,12$	Koeficient strát pary na výstupe z hlavice kazety
$\xi = 0,13$	Koeficient strát pary na vstupe do distančnej mreže kazety
$\xi = 0,05$	Koeficient strát pary na výstupe z distančnej mreže kazety
$\xi = 0,21$	Koeficient strát pary na vstupe do opornej mreže kaziet
$\xi = 0,15$	Koeficient strát pary na výstupe z opornej mreže kaziet
$\xi = 2,0$	Koeficient strát pri prechode pary eliptickým dnom
$\xi = 0,3$	Koeficient strát pary na výstupe z II. stupňa

8.3 Výpočet rýchlosti pracovnej pary pri prechode jednotlivými časťami SPP

- **Rýchlosť vlhkej pary vo vstupnom potrubí**

$$w_1 = \frac{\dot{m}_v}{S_1 \cdot \rho_1} \quad (66)$$

$$w_1 = \frac{138,889}{1,131 \cdot 2,0287}$$

$$w_1 = 60,53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť pary na vstupe do kazety I. stupňa**

$$w_2 = \frac{\dot{m}_I \cdot \vartheta_{I.(str)}}{z_1 \cdot S_2} \quad (67)$$

$$w_2 = \frac{120,83 \cdot 0,6557}{94 \cdot 0,04323}$$

$$w_2 = 19,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary pri obtekaní hlavice kazety I. stupňa**

$$w_3 = \frac{\dot{m}_I \cdot \vartheta_{I.(str)}}{z_1 \cdot S_3} \quad (68)$$

$$w_3 = \frac{120,83 \cdot 0,6557}{94 \cdot 0,02338}$$

$$w_3 = 36,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary na neorebrovanej časti rúrok kazety I. stupňa**

$$w_4 = \frac{\dot{m}_I \cdot \vartheta_{I.(str)}}{z_1 \cdot S_3} \quad (69)$$

$$w_4 = \frac{120,83 \cdot 0,6557}{94 \cdot 0,0358}$$

$$w_4 = 23,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary na distančnej mriežke kazety I. stupňa**

$$w_5 = \frac{\dot{m}_I \cdot \vartheta_{I.(str)}}{z_1 \cdot S_3} \quad (70)$$

$$w_5 = \frac{120,83 \cdot 0,6557}{94 \cdot 0,0275}$$

$$w_5 = 30,65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary na orebrovanej časti rúrok kazety I. stupňa**

$$w_6 = \frac{\dot{m}_I \cdot \vartheta_{I.(str)}}{z_1 \cdot S_3} \quad (71)$$

$$w_6 = \frac{120,83 \cdot 0,6557}{94 \cdot 0,03154}$$

$$w_6 = 26,72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary na podpernej mreži kazety I. stupňa**

$$w_7 = \frac{\dot{m}_V \cdot \vartheta_I}{z_1 \cdot S_7} \quad (72)$$

$$w_7 = \frac{120,83 \cdot 0,7602}{94 \cdot 0,02763}$$

$$w_7 = 35,37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary na eliptickom dne SPP**

$$w_8 = \frac{\dot{m}_v \cdot \vartheta_{I(výst)}}{z_1 \cdot S_2} \quad (73)$$

$$w_8 = \frac{120,83 \cdot 0,7602}{94 \cdot 0,04323}$$

$$w_8 = 22,60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary na podpernej mreži kazety II. stupňa**

$$w_9 = \frac{\dot{m}_v \cdot \vartheta_{I(výst)}}{z_1 \cdot S_7} \quad (74)$$

$$w_9 = \frac{120,83 \cdot 0,7602}{93 \cdot 0,02763}$$

$$w_9 = 34,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary na neorebrovanej časti rúrok**

$$w_{10} = \frac{\dot{m}_v \cdot \vartheta_{II(str)}}{z_2 \cdot S_2} \quad (75)$$

$$w_{10} = \frac{120,83 \cdot 0,7406}{93 \cdot 0,04323}$$

$$w_{10} = 22,26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary cez distančnú mriežku kazety II. stupňa**

$$w_{11} = \frac{\dot{m}_v \cdot \vartheta_{II(str)}}{z_2 \cdot S_3} \quad (76)$$

$$w_{11} = \frac{120,83 \cdot 0,7406}{93 \cdot 0,02338}$$

$$w_{11} = 41,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary na vstupe do kazety II. stupňa**

$$w_{12} = \frac{\dot{m}_v \cdot \vartheta_{II(str)}}{z_2 \cdot S_4} \quad (77)$$

$$w_{12} = \frac{120,83 \cdot 0,7406}{93 \cdot 0,0358}$$

$$w_{12} = 26,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary v distančnej mriežke II. stupňa**

$$w_{13} = \frac{\dot{m}_v \cdot \vartheta_{II(str)}}{z_2 \cdot S_5} \quad (78)$$

$$w_{13} = \frac{120,83 \cdot 0,7406}{93 \cdot 0,0275}$$

$$w_{13} = 34,99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary v orebrovanej časti rúrok**

$$w_{14} = \frac{\dot{m}_v \cdot \vartheta_{II(str)}}{z_2 \cdot S_6} \quad (79)$$

$$w_{14} = \frac{120,83 \cdot 0,7406}{93 \cdot 0,03154}$$

$$w_{14} = 30,51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Rýchlosť prehrievanej pary vo výstupnom potrubí**

$$w_{14} = \frac{\dot{m}_v \cdot \vartheta_{II(výst)}}{S_8} \quad (80)$$

$$w_{14} = \frac{120,83 \cdot 0,7818}{1,131}$$

$$w_{14} = 83,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

8.4 Výpočet tlakových strát pracovnej pary

- **Tlaková strata vstupného potrubia**

$$\Delta p_1 = \xi_1 \cdot \frac{w_1^2}{2} \cdot \rho_1'' \quad (81)$$

$$\Delta p_1 = 1,1 \cdot \frac{60,53^2}{2} \cdot 1,765$$

$$\Delta p_1 = 3556,71 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata separátora**

$$\Delta p_2 = \xi_2 \cdot \frac{w_1^2}{2} \cdot \rho_1'' \quad (82)$$

$$\Delta p_2 = 0,99 \cdot \frac{60,53^2}{2} \cdot 1,765$$

$$\Delta p_2 = 3201,04 \text{ Pa}$$

- **Reynoldsovo číslo pre ekvivalentný priemer I. stupňa**

$$Re_{Iep} = \frac{w_6 \cdot d_{el}}{v_{Istr}} \quad (83)$$

$$Re_{Iep} = \frac{26,72 \cdot 0,0123}{9,45075 \cdot 10^{-6}}$$

$$Re_{Iep} = 34775,65$$

- **Trecí súčiniteľ I. stupňa**

$$\beta_I = \frac{0,3164}{Re_{Iep}^{0,25}} \quad (84)$$

$$\beta_I = \frac{0,3164}{Re_{Iep}^{0,25}}$$

$$\beta_I = 0,02371$$

- **Tlaková strata trením v I. stupni**

$$\Delta p_3 = \frac{\beta_I \cdot L_r \cdot w_6^2}{d_{el} \cdot \vartheta_{Istr} \cdot 2} \quad (85)$$

$$\Delta p_3 = \frac{0,02371 \cdot 2,4 \cdot 26,72^2}{0,0123 \cdot 0,6557 \cdot 2}$$

$$\Delta p_3 = 2153,66 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata pri obtekaní hlavíc kaziet I. stupňa**

$$\Delta p_4 = (\xi_3 + \xi_4) \cdot \frac{w_3^2}{2 \cdot \vartheta_{Istr}} \quad (86)$$

$$\Delta p_4 = (0,21 + 0,12) \cdot \frac{36,05^2}{2 \cdot 0,6557}$$

$$\Delta p_4 = 327,03 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata v distančných mriežkach kaziet I. stupňa**

$$\Delta p_5 = (\xi_5 + \xi_6) \cdot \frac{w_5^2}{2 \cdot \vartheta_{Istr}} \quad (87)$$

$$\Delta p_5 = (0,13 + 0,05) \cdot \frac{30,65^2}{2 \cdot 0,6557}$$

$$\Delta p_5 = 128,94 \text{ Pa}$$

- **Celková tlaková strata kaziet I. stupňa**

$$\Delta p_6 = \Delta p_3 + o_1 \cdot \Delta p_4 + o_2 \cdot \Delta p_5 \quad (88)$$

$$\Delta p_6 = 2153,66 + 2 \cdot 327,03 + 4 \cdot 128,94$$

$$\Delta p_6 = 3323,48 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata v podpernej mreži I. stupňa**

$$\Delta p_7 = (\xi_7 + \xi_8) \cdot \frac{w_7^2}{2 \cdot \vartheta_{I(\text{výst})}} \quad (89)$$

$$\Delta p_7 = (0,21 + 0,15) \cdot \frac{30,65^2}{2 \cdot 0,7602}$$

$$\Delta p_7 = 296,22 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata v eliptickom dne**

$$\Delta p_8 = \xi_9 \cdot \frac{w_8^2}{2 \cdot \vartheta_{I(\text{výst})}} \quad (90)$$

$$\Delta p_8 = 2,0 \cdot \frac{22,60^2}{2 \cdot 0,7602}$$

$$\Delta p_8 = 671,88 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata v podpernej mreži II. Stupňa**

$$\Delta p_9 = (\xi_7 + \xi_8) \cdot \frac{w_9^2}{2 \cdot \vartheta_{II(\text{str})}} \quad (91)$$

$$\Delta p_9 = (0,21 + 0,15) \cdot \frac{34,83^2}{2 \cdot 0,7406}$$

$$\Delta p_9 = 294,85 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata hlavice kazety II. Stupňa**

$$\Delta p_{10} = (\xi_3 + \xi_4) \cdot \frac{w_{11}^2}{2 \cdot \vartheta_{II(\text{str})}} \quad (92)$$

$$\Delta p_{10} = (0,21 + 0,12) \cdot \frac{41,16^2}{2 \cdot 0,7406}$$

$$\Delta p_{10} = 377,44 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata distančnej mriežky II. Stupňa**

$$\Delta p_{11} = (\xi_5 + \xi_6) \cdot \frac{w_{13}^2}{2 \cdot \vartheta_{II(str)}} \quad (93)$$

$$\Delta p_{11} = (0,13 + 0,05) \cdot \frac{34,99^2}{2 \cdot 0,7406}$$

$$\Delta p_{11} = 80,41 \text{ Pa}$$

- **Reynoldsovo číslo pre ekvivalentný priemer II. stupňa v orebrovanej časti kazety**

$$Re_{IIep} = \frac{w_6 \cdot d_{elI}}{v_{Istr}} \quad (94)$$

$$Re_{IIep} = \frac{26,72 \cdot 0,0124}{11,87 \cdot 10^{-6}}$$

$$Re_{IIep} = 31615,25$$

- **Trecí súčiniteľ II. stupňa**

$$\beta_I = \frac{0,3164}{Re_{IIep}^{0,25}} \quad (95)$$

$$\beta_I = \frac{0,3164}{Re_{IIep}^{0,25}}$$

$$\beta_I = 0,02373$$

- **Tlaková strata trením v II. stupni**

$$\Delta p_3 = \frac{\beta_{II} \cdot L_r \cdot w_{14}^2}{d_{el} \cdot \vartheta_{Istr} \cdot 2} \quad (96)$$

$$\Delta p_3 = \frac{0,02373 \cdot 2,4 \cdot 26,72^2}{0,0124 \cdot 0,7406 \cdot 2}$$

$$\Delta p_1 = 2546,14 \text{ Pa}$$

- **Celková strata kazety II. stupňa**

$$\Delta p_{13} = \Delta p_{12} + o_1 \cdot \Delta p_{10} + o_2 \cdot \Delta p_{11} \quad (97)$$

$$\Delta p_{13} = 2546,14 + 2 \cdot 377,44 + 4 \cdot 80,41$$

$$\Delta p_{13} = 3622,66 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata na výstupe SPP**

$$\Delta p_{14} = \xi_{10} \cdot \frac{w_{15}^2}{2 \cdot \vartheta_{II(výst)}} \quad (98)$$

$$\Delta p_{14} = 0,3 \cdot \frac{83,52^2}{2 \cdot 0,7818}$$

$$\Delta p_{14} = 1338,37 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata I. stupňa – celková**

$$\Delta p_{15} = \Delta p_6 + \Delta p_7 + \Delta p_8 \quad (99)$$

$$\Delta p_{15} = 3323,48 + 296,22 + 1338,37$$

$$\Delta p_{15} = 4291,58 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata II. stupňa – celková**

$$\Delta p_{16} = \Delta p_9 + \Delta p_{13} + 14 \quad (100)$$

$$\Delta p_{16} = 294,85 + 3622,66 + 1338,39$$

$$\Delta p_{16} = 5255,88 \text{ Pa}$$

- **Tlaková strata SPP – celková**

$$\Delta p_{17} = \Delta p_2 + \Delta p_{15} + \Delta p_{16} \quad (101)$$

$$\Delta p_{17} = 3201,04 + 4291,58 + 5255,88$$

$$\Delta p_{17} = 12748,5 \text{ Pa}$$

- **Tlak na vstupe do separátora**

$$p_{sep} = p_1 + \Delta p_1 \quad (102)$$

$$p_{sep} = 0,3 \cdot 10^6 + 3201,04$$

$$p_{sep} = 0,3032 \text{ MPa}$$

- **Tlak na výstupe z I. stupňa**

$$\Delta p_1 = p_1 - \Delta p_{16} \quad (103)$$

$$\Delta p_1 = 0,3 \cdot 10^6 - 5255,88$$

$$\Delta p_1 = 0,295 \text{ MPa}$$

- **Tlak na výstupe z II. stupňa**

$$\Delta p_1 = p_{\text{sep}} - \Delta p_{17} \quad (104)$$

$$\Delta p_1 = 0,3032 - 12748,5$$

$$\Delta p_1 = 0,29 \text{ MPa}$$

9 PEVNOSTNÝ VÝPOČET

Pevnostný výpočet je realizovaný podľa normy 69 0010.

9.1 Pevnostná kontrola valcového plášťa separátora – prehrievača

Vstupné hodnoty a konštrukčné konštanty nádoby, pre materiál akosti 11 416

Výpočtová teplota – maximálna	$t = 272^\circ\text{C}$
Medza klzu pri teplote 272°C	$Re = 175,5 \text{ MPa}$
Medza pevnosti pri teplote 272°C	$Rm = 400 \text{ MPa}$
Koeficient bezpečnosti pre medzu klzu	$x_e = 1,5$
Koeficient bezpečnosti pre medzu klzu	$x_m = 2,4$
Výpočtový pretlak SPP – vnútorný	$p_v = 0,4 \text{ MPa}$
Vonkajší priemer SPP	$S_N = 0,02 \text{ m}$
Prídavok na koróziu	$c = 0,002 \text{ m}$
Navrhovaná hrúbka steny nádoby	$D = 3,52 \text{ m}$

- **Stanovenie dovoleného namáhania valcového plášťa**

$$\sigma_D = \frac{Re}{x_e} \quad (105)$$

$$\sigma_D = \frac{175,5}{1,5}$$

$$\sigma_D = 117 \text{ MPa}$$

alebo

$$\sigma_D = \frac{Rm}{x_m} \quad (106)$$

$$\sigma_D = \frac{400}{2,4}$$

$$\sigma_D = 166,67 \text{ MPa}$$

Pre hodnotu dovoleného namáhania sa volím nižšiu hodnotu z uvedených.

- **Výpočtová hrúbka steny nádoby**

$$s_o = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi_{zs} - p} \quad (107)$$

$$s_o = \frac{0,4 \cdot 3,52}{2 \cdot 117 \cdot 0,7 - 0,4}$$

$$s_o = 0,00869 \text{ m}$$

$$S_o < S_N$$

0,00869 < 0,02 ... navrhovaná hrúbka steny nádoby vyhovuje

- **Dovolený vnútorný pretlak nádoby**

$$p_{Dov} = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi_{zs} \cdot (S_N - c)}{D + (S_N - c)} \quad (108)$$

$$p_{Dov} = \frac{2 \cdot 117 \cdot 0,7 \cdot (0,02 - 0,002)}{3,52 + (0,02 - 0,002)}$$

$$p_{Dov} = 0,833 \text{ MPa}$$

- **Kontrola pre tlakovú skúšku**

Médiom pre tlakovú skúšku je demivoda s 10% obsahom monoetanolamínu. Tlaková skúška sa realizuje pri teplote 20 °C.

Medza klzu pri teplote 20 °C

$$Re_{20} = 255 \text{ MPa}$$

Skúšobný pretlak

$$p_s = 0,6 \text{ MPa}$$

Koeficient k medzi klzu pre tlakovú skúšku

$$x_s = 1,1$$

- **Určenie dovoleného namáhania**

$$\sigma_{Ds} = \frac{Re_{20}}{x_s} \quad (109)$$

$$\sigma_{Ds} = \frac{255}{1,4}$$

$$\sigma_{Ds} = 231,8 \text{ MPa}$$

- **Výpočtová hrúbka steny nádoby**

$s_{ot} = \frac{p_s \cdot D}{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi_{zs} - p}$ $s_{ot} = \frac{0,6 \cdot 3,52}{2 \cdot 231,8 \cdot 0,7 - 0,6}$ $s_{ot} = 0,0062 \text{ m}$	(110)
--	-------

$$s_{ot} < s_N$$

0,0062 < 0,02 ... navrhovaná hrúbka steny nádoby vyhovuje

9.2 Pevnostná kontrola eliptického dna nádoby

Konštrukčné konštanty

Dovolené namáhanie	$\sigma_D = 117 \text{ MPa}$
Výška klenutia dna	$H = 0,9 \text{ m}$
Lem eliptického dna	$l = 0,06 \text{ m}$
Vonkajší priemer SPP	$D = 3,52 \text{ m}$
Navrhovaná hrúbka steny	$s_N = 0,02 \text{ m}$
Výpočtový pretlak SPP – vnútorný	$p_v = 0,4 \text{ MPa}$
Vonkajší priemer SPP	$D = 3,52 \text{ m}$
Prídavok na koróziu	$c = 0,002 \text{ m}$
Navrhovaná hrúbka steny	$s_N = 0,02 \text{ m}$

- **Výpočtová hrúbka steny eliptického dna**

$$s_{o2} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi_{zs} - 0,5 \cdot p} \quad (111)$$

$$s_{o2} = \frac{0,4 \cdot 3,52}{2 \cdot 117 \cdot 0,7 - 0,5 \cdot 0,4}$$

$$s_{o2} = 0,00860 \text{ m}$$

- **Dovolený vnútorný pretlak eliptického dna**

$$p_{Dov} = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi_{zs} \cdot (S_N - c)}{D + 0,5(S_N - c)} \quad (112)$$

$$p_{Dov} = \frac{2 \cdot 117 \cdot 0,7 \cdot (0,02 - 0,002)}{3,52 + 0,5(0,02 - 0,002)}$$

$$p_{Dov} = 1,31 \text{ MPa}$$

- **Polomer krivosti eliptického dna**

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} \quad (113)$$

$$R = \frac{3,52^2}{4 \cdot 0,9}$$

$$R = 3,44$$

Kontrola pre tlakovú skúšku

- **Výpočtová hrúbka steny nádoby**

$$s_{ot2} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi_{zs} - 0,5 \cdot p} \quad (114)$$

$$s_{ot2} = \frac{0,89 \cdot 3,52}{2 \cdot 231,8 \cdot 0,7 - 0,5 \cdot 0,4}$$

$$s_{ot2} = 0,0096 \text{ m}$$

$$S_{ot} < S_N$$

0,0096 < 0,02 ... navrhovaná hrúbka steny nádoby vyhovuje

9.3 Pevnostná kontrola kuželového veka

Kontrola pre prevádzkový stav

Dovolené namáhanie	$\sigma_D = 117 \text{ MPa}$
Vonkajší priemer kuželového veka	$D_{kv} = 3,56 \text{ m}$
Polovičný uhol kuželového veka	$\gamma = 70^\circ$
Hrúbka horného veka	$s_{kv} = 0,6 \text{ m}$
Navrhovaná hrúbka steny	$S_N = 0,02 \text{ m}$
Výpočtový pretlak SPP – vnútorný	$p_v = 0,4 \text{ MPa}$
Vonkajší priemer SPP	$D = 3,52 \text{ m}$
Prídavok na koróziu	$c = 0,002 \text{ m}$
Vonkajší priemer výstuhu potrubia	$D_{vp} = 1,24 \text{ m}$

- **Výpočtová hrúbka steny kuželového veka**

$$s_{03} = \frac{p \cdot D_{kv}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi_{zs} - p} \cdot \frac{1}{\cos \gamma} \quad (115)$$

$$s_{03} = \frac{0,4 \cdot 3,56}{2 \cdot 117 \cdot 0,7 - 0,4} \cdot \frac{1}{\cos 70^\circ}$$

$$s_{03} = 0,0138 \text{ m}$$

$$s_{03} < s_{kv}$$

0,0138 < 0,6 ... navrhovaná hrúbka steny nádoby vyhovuje

Kontrola pre tlakovú skúšku

$$s_{03} = \frac{p \cdot D_{kv}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi_{zs} - p} \cdot \frac{1}{\cos \gamma} \quad (116)$$

$$s_{03} = \frac{0,6 \cdot 3,56}{2 \cdot 231,8 \cdot 0,7 - 0,6} \cdot \frac{1}{\cos 70^\circ}$$

$$s_{03} = 0,0104 \text{ m}$$

$$s_{03} < s_{kv}$$

0,0104 < 0,0138 ... vyhovuje

9.4 Pevnostná kontrola orebrovanej rúrky

Vstupné hodnoty a konštrukčné konštanty rúrky, pre materiál akosti 12 022.1

Medza klzu pri teplote 272 °C	$Re = 145 \text{ MPa}$
Vonkajší priemer rúrky	$d_1 = 0,016 \text{ m}$
Vnútorný priemer rúrky	$d_2 = 0,012 \text{ m}$
Bezpečnostný súčiniteľ k medzi klzu	$x_e = 1,5$
Navrhovaná hrúbka steny rúrky	$s_{rN} = 0,002 \text{ m}$
Výpočtový pretlak SPP – vnútorný	$p_{v2} = 5,69 \text{ MPa}$

- **Stanovenie dovoleného namáhania**

$$\sigma_{D2} = \frac{Re}{x_e} \quad (117)$$

$$\sigma_{D2} = \frac{145}{1,5}$$

$$\sigma_{D2} = 96,7 \text{ MPa}$$

- **Vnútorné napätie v rúrke od pretlaku**

$$\sigma_{pt1} = \frac{p_2 \cdot (d_1 - s_{rN})}{2 \cdot s_{rN}} \quad (118)$$

$$\sigma_{pt1} = \frac{5,69 \cdot (0,016 - 0,002)}{2 \cdot 0,002}$$

$$\sigma_{pt1} = 19,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{pt1} < \sigma_{D2}$$

$$19,9 < 96,7 \dots \text{vyhovuje}$$

Kontrola pre tlakovú skúšku, pri pretlaku 8,54 MPa

- **Vnútorné napätie v rúrke od pretlaku**

$$\sigma_{pt2} = \frac{p_2 \cdot (d_1 - s_{rN})}{2 \cdot s_{rN}} \quad (119)$$

$$\sigma_{pt2} = \frac{8,54 \cdot (0,016 - 0,002)}{2 \cdot 0,002}$$

$$\sigma_{pt2} = 29,89 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{pt1} < \sigma_{pt2}$$

$$19,9 < 29,89 \dots \text{vyhovuje}$$

9.5 Pevnostná kontrola rozvážacej rúrky

Vstupné hodnoty a konštrukčné konštanty rúrky, pre materiál akosti 12 022.1

Medza klzu pri teplote 272 °C	$Re = 145 \text{ MPa}$
Vonkajší priemer rúrky	$d_3 = 0,028 \text{ m}$
Vnútorný priemer rúrky	$d_4 = 0,022 \text{ m}$
Bezpečnostný súčiniteľ k medzi klzu	$x_e = 1,5$
Navrhovaná hrúbka steny rúrky	$s_{rN2} = 0,003 \text{ m}$
Výpočtový pretlak SPP – vnútorný	$p_{v2} = 5,69 \text{ MPa}$

• Hrúbka steny rúrky – výpočtová

$$s_{rv} = \frac{p_2 \cdot (d_4 + 2 \cdot s_{rN2})}{2 \cdot \sigma_{D2} + p_2} \quad (120)$$

$$s_{rv} = \frac{5,69 \cdot (0,022 + 2 \cdot 0,003)}{2 \cdot 96,7 + 5,69}$$

$$s_{rv} = 0,0008 \text{ m}$$

$$s_{rv} < s_{rN2}$$

0,0008 < 0,003 ... navrhnutá hrúbka steny rúrky vyhovuje

Kontrola pre tlakovú skúšku, pri pretlaku 8,54 MPa

$$s_{rvt} = \frac{p_{t2} \cdot (d_4 + 2 \cdot s_{rN2})}{2 \cdot \sigma_{D2} + p_2} \quad (121)$$

$$s_{rvt} = \frac{8,54 \cdot (0,022 + 2 \cdot 0,003)}{2 \cdot 96,7 + 8,54}$$

$$s_{rvt} = 0,0013 \text{ m}$$

$$s_{rvt} < s_{rN2}$$

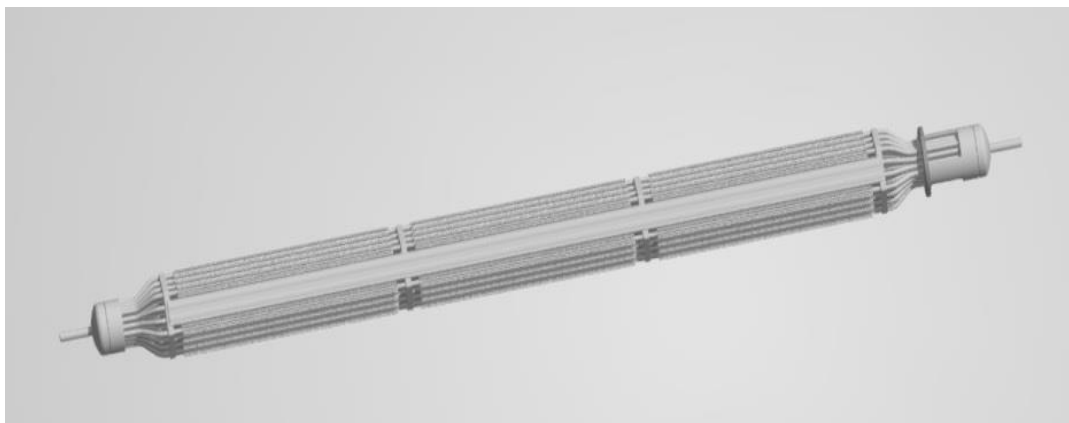
0,0008 < 0,003 ... navrhnutá hrúbka steny rúrky vyhovuje

10 MODEL SEPARÁTORA – PREHRIEVAČA PARY

Na základe predchádzajúcich výpočtov, bol zhotovený model 3D model jednotlivých častí tohoto zariadenia, ktoré sú vyobrazené na nasledujúcich obrázkoch.



Separáčná a prehrievacia časť nádoby



Kazeta prehrievača

11 ZÁVER

Táto diplomová práca sa zaoberala projekčným návrhom separátora – prehrievača pary, kde pre vytvorenie realistického modelu, bolo potrebné navrhnuť jednotlivé časti zariadenia. V prvej boli prevedené možnosti zbavovania vlhkosti pracovnej pary, kde boli vysvetlené základné typy separátorov, následne bol vybraný jeden typ SPP. V ďalšej časti bola na základe zvolených parametrov a zadaných hodnôt, určená veľkosť separačnej časti, rýchlosť pary vstupujúcej do separátora a tlaková strata žalúziových blokov.

Pri tepelnom výpočte sme zisťovali rezervnú plochu vykurovacích kaziet, ktorá sa pri tomto výpočte pohybuje okolo 40% a je potrebná pre prípadnú opravu rúrok ich zaslepovaním. V hydraulickom výpočte sme zistili rýchlosti pracovnej pary v jednotlivých častiach zariadenia a jeho celkovú tlakovú stratu.

V pevnostnom výpočte bola určené hrúbky stien nádoby, eliptického dna, kužeľového veka, rúrok kazety prehrievača a rúrok rozvádzacích, ktoré sú kritickými časťami SPP.

Zoznam použitej literatúry

- [1] HEJZLAR, R.: Stroje a zařízení jaderných elektráren. 1. Díl. Praha: České vysoké učení technické, 1994. 166 s. ISBN 80-01-00164-4.
- [2] HEJZLAR, R.: Stroje a zařízení jaderných elektráren. 2. Díl. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2000. 211 s. ISBN 80-01-02134-3.
- [3] KOLAT, P.: Přenos tepla a hmoty. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1986.
- [4] Hezoučský, F.: Základy provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4
- [4] MAREŠ, R., ŠIFNER, O., KADRNOŽKA, J.: Tabulky vlastností vody a páry podle průmyslové formulace IAPWS-IF97. Brno: VUTIUM, 1999.
- [5] KUTATELADZE, S. S., BORISANSKIJ, V. M.: Příručka sdílení tepla. STNL Praha. 1962. 527 s.
- [6] ZVARA, J.: Separátory a prihrievače pary pre jadrové elektrárne. Editačné stredisko SVŠT v Bratislave. 1976. 82 s.
- [7] JANEBA, B., KARTÁK, J.: Výpočty kotlů a parogenerátorů. Vydavatelství ČVUT v Praze, 1975. 240 s.
- [8] ČERNÝ, V. A kol.: Základy konstruování kotlů a parogenerátorů jaderných elektráren. Vydavatelství ČVUT v Praze, 1974. 259 s
- [9] FOŘT, P., KLETEČKA, J.: Autodesk Inventor, Funkční navrhování v průmyslové praxi. Computer Press a. s., Brno. 2007. 318 s.
- [10] HRNČÍRIK, J.: Sekundárna časť JE EMO, učebný text. VUJE a. s., školiace a výskumné stredisko pre personál JZ, Trnava. 2011. 185 s.

Zoznam príloh

DIP – ESZ 01	SEPARÁTOR – PREHRIEVAČ PARY
DIP – ESZ 02	KAZETA PREHRIEVAČA
DIP – ESZ 03	schematické zapojenie SPP
Zostava SPP.iam	3D model separátora – prehrievača pary (inventor)